

10/540003

JC20 Rec'd PCTA 21 JUN 2005

DOCKET NO.: 273626US2PCT

**IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE**

IN RE APPLICATION OF: Jerome HAZART

SERIAL NO.: NEW U.S. PCT APPLICATION

FILED: HEREWITH

INTERNATIONAL APPLICATION NO.: PCT/FR03/50211

INTERNATIONAL FILING DATE: December 24, 2003

FOR: METHOD OF OPTICAL CHARACTERISATION OF MATERIALS WITHOUT USING A PHYSICAL MODEL

**REQUEST FOR PRIORITY UNDER 35 U.S.C. 119  
AND THE INTERNATIONAL CONVENTION**

Commissioner for Patents  
Alexandria, Virginia 22313

Sir:

In the matter of the above-identified application for patent, notice is hereby given that the applicant claims as priority:

<b>COUNTRY</b>	<b>APPLICATION NO</b>	<b>DAY/MONTH/YEAR</b>
France	02 16847	30 December 2002
France	03 50635	02 October 2003

Certified copies of the corresponding Convention application(s) were submitted to the International Bureau in PCT Application No. PCT/FR03/50211. Receipt of the certified copy(s) by the International Bureau in a timely manner under PCT Rule 17.1(a) has been acknowledged as evidenced by the attached PCT/IB/304.

Respectfully submitted,  
OBLON, SPIVAK, McCLELLAND,  
MAIER & NEUSTADT, P.C.

*Surinder Sachar*

Marvin J. Spivak  
Attorney of Record  
Registration No. 24,913  
Surinder Sachar  
Registration No. 34,423

Customer Number

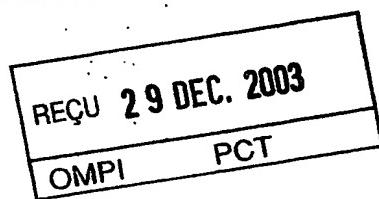
**22850**

(703) 413-3000  
Fax No. (703) 413-2220  
(OSMMN 08/03)



# BREVET D'INVENTION

## CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION



## COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 26 NOV. 2003

Pour le Directeur général de l'Institut national de la propriété Industrielle  
Le Chef du Département des brevets

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Martine PLANCHE'.

Martine PLANCHE

### DOCUMENT DE PRIORITÉ

PRÉSENTÉ OU TRANSMIS  
CONFORMÉMENT À LA  
RÈGLE 17.1.a) OU b)

INSTITUT  
NATIONAL DE  
LA PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE

SIEGE  
26 bis, rue de Saint Petersbourg  
75800 PARIS cedex 08  
Téléphone : 33 (0)1 53 04 53 04  
Télécopie : 33 (0)1 53 04 45 23  
[www.inpi.fr](http://www.inpi.fr)



INSTITUT  
NATIONAL DE  
LA PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE

26 bis, rue de Saint Pétersbourg  
75800 Paris Cedex 08  
Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

# BREVET D'INVENTION

## CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI

N° 11354\*03

**BRI**

### REQUÊTE EN DÉLIVRANCE

page 1/2

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

08 540 - 7 / 210502

<p>REMISE DES PIÈCES DATE <b>30 DEC 2002</b></p> <p>LIEU <b>75 INPI PARIS</b></p> <p>N° D'ENREGISTREMENT <b>0216847</b></p> <p>NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI</p> <p>DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉE PAR L'INPI <b>30 DEC. 2002</b></p>		<p>Réserve à l'INPI</p> <p><input type="checkbox"/> NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE</p> <p><b>BREVATOME</b></p> <p>3, rue du Docteur Lancereaux 75008 PARIS 422-5 S/002</p>
<p>Vos références pour ce dossier ( facultatif ) <b>B14206.3/PV DD2381</b></p>		
<p><b>Confirmation d'un dépôt par télécopie</b></p>		<p><input type="checkbox"/> N° attribué par l'INPI à la télécopie</p>
<p><b>2 NATURE DE LA DEMANDE</b></p>		<p><b>Cochez l'une des 4 cases suivantes</b></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Demande de brevet</p> <p><input type="checkbox"/> Demande de certificat d'utilité</p> <p><input type="checkbox"/> Demande divisionnaire</p> <p><i>Demande de brevet initiale</i></p> <p><i>ou demande de certificat d'utilité initiale</i></p> <p>Transformation d'une demande de brevet européen <i>Demande de brevet initiale</i></p>
		<p>N° _____ Date _____</p> <p>N° _____ Date _____</p> <p>N° _____ Date _____</p>
<p><b>3 TITRE DE L'INVENTION</b> (200 caractères ou espaces maximum)</p> <p><b>PROCEDE DE CARACTERISATION OPTIQUE DE MATERIAUX SANS UTILISATION DE MODELE PHYSIQUE.</b></p>		
<p><b>4 DECLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE</b></p>		<p>Pays ou organisation Date _____ N° _____</p> <p>Pays ou organisation Date _____ N° _____</p> <p>Pays ou organisation Date _____ N° _____</p> <p><input type="checkbox"/> S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»</p>
<p><b>5 DEMANDEUR</b> (Cochez l'une des 2 cases)</p>		<p><input checked="" type="checkbox"/> Personne morale <input type="checkbox"/> Personne physique</p>
<p>Nom ou dénomination sociale</p> <p>Prénoms</p> <p>Forme juridique</p> <p>N° SIREN</p> <p>Code APE-NAF</p> <p>Domicile ou siège</p> <p>Rue</p> <p>Code postal et ville</p> <p>Code postal et ville</p> <p>Pays</p> <p>Nationalité</p> <p>N° de téléphone ( facultatif )</p> <p>Adresse électronique ( facultatif )</p>		<p>COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE</p> <p>Etablissement de caractère Scientifique, Technique et Industriel</p> <p>31-33 rue de la Fédération</p> <p>FRANCE FRANCAISE</p> <p>N° de télécopie ( facultatif ) 0</p> <p><input type="checkbox"/> S'il y a plus d'un demandeur, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»</p>

Remplir impérativement la 2<sup>me</sup> page

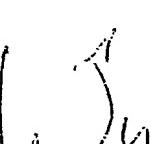
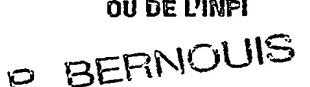
**BREVET D'INVENTION  
CERTIFICAT D'UTILITÉ**

**REQUÊTE EN DÉLIVRANCE**

**BR2**

		Réervé à l'INPI
REMISE DES PIÈCES	DATE	30 DEC 2002
DATE	LIEU	75 INPI PARIS
N° D'ENREGISTREMENT		0216847
NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI		

CB 549 W / 210532

<b>6 MANDATAIRE (s'il y a lieu)</b>	
Nom	LÉHU
Prénom	Jean
Cabinet ou Société	BREVATOME 422.5/S002
N °de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel	7068 du 12.06.98
Rue	3, rue du Docteur Lancereaux
Adresse	Code postal et ville [ 7 5 0 0 8 ] PARIS
Pays	FRANCE
N° de téléphone (facultatif)	01 53 83 94 00
N° de télécopie (facultatif)	01 45 63 83 33
Adresse électronique (facultatif)	brevets.patents@brevalex.com
<b>7 INVENTEUR (S)</b>	Les inventeurs sont nécessairement des personnes physiques
Les demandeurs et les inventeurs sont les mêmes personnes	<input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non : Dans ce cas remplir le formulaire de Désignation d'inventeur(s)
<b>8 RAPPORT DE RECHERCHE</b>	Uniquement pour une demande de brevet (y compris division et transformation)
Établissement immédiat ou établissement différé	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Palement échelonné de la redevance (en deux versements)	Uniquement pour les personnes physiques effectuant elles-mêmes leur propre dépôt <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
<b>9 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES</b>	Uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Requise pour la première fois pour cette invention (joindre un avis de non-imposition) <input type="checkbox"/> Obtenu antérieurement à ce dépôt pour cette invention (joindre une copie de la décision d'admission à l'assistance gratuite ou indiquer sa référence) : AG [ ]
<b>10 SÉQUENCES DE NUCLEOTIDES ET/OU D'ACIDES AMINÉS</b>	<input type="checkbox"/> Cochez la case si la description contient une liste de séquences
Le support électronique de données est joint	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
La déclaration de conformité de la liste de séquences sur support papier avec le support électronique de données est jointe	
Si vous avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes	
<b>11 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire)</b>	
J. LEHU	VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI 

La loi n°78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés s'applique aux réponses faites à ce formulaire. Elle garantit un droit d'accès et de rectification pour les données vous concernant auprès de l'INPI.

PROCEDE DE CARACTERISATION OPTIQUE DE MATERIAUX SANS  
UTILISATION DE MODELE PHYSIQUE

DESCRIPTION

5 DOMAINE TECHNIQUE

La présente invention concerne un procédé de caractérisation optique de matériaux.

10 Ce procédé permet de caractériser des couches minces ou épaisses de ces matériaux, qui sont formées sur des substrats. Les grandeurs physiques, que ce procédé permet de déterminer, sont:

- l'épaisseur d'une couche d'un matériau,
- l'indice de réfraction de ce matériau, et;
- le coefficient d'absorption de ce

15 matériau.

La caractérisation optique des matériaux est utile pour l'analyse chimique de ces matériaux (notamment étude des bandes d'absorption, des propriétés de densification et des propriétés 20 d'oxydation), dans les domaines de la micro-électronique, des capteurs, de la biologie, de la médecine), ou bien pour l'analyse des épaisseurs de dépôts de ces matériaux.

Pour des exemples d'application, on se 25 reportera au document [1] qui, comme les autres documents cités par la suite, est mentionné à la fin de la présente description.

La caractérisation des propriétés optiques d'un matériau est également utile lorsque le matériau 30 est par la suite structuré (pour y former par exemple des gravures ou des rugosités) et que les propriétés de

diffraction optique de la structure obtenue doivent être calculées (voir le document [2]).

Indiquons dès à présent que l'invention est particulièrement utile lorsque la loi physique suivie par l'indice de réfraction complexe du matériau que l'on veut caractériser n'est, a priori, pas connue.

#### ETAT DE LA TECHNIQUE ANTERIEURE

On rappelle que les mesures optiques peuvent être de diverses natures :

Il peut s'agir de mesures réflectométriques. Dans ce cas, le coefficient de réflexion en intensité d'une structure est mesuré sur un spectre (c'est-à-dire un intervalle) de longueurs d'ondes  $[\lambda_m, \lambda_M]$ .

L'angle d'incidence de la lumière d'éclairage peut être non nul. Le coefficient de réflexion peut être mesuré pour plusieurs angles d'incidence  $\theta$ . Nous noterons  $R(\theta, \lambda, p)$  le spectre réflectométrique, où  $p$  est la polarisation du faisceau incident et  $\lambda$  la longueur d'onde de ce dernier.

Généralement, l'angle  $\theta$  est nul et la polarisation  $p$  indéterminée. Dans le cas où  $\theta$  n'est pas nul, il faut connaître cette polarisation  $p$ . En général, cette dernière est de type (S) où (P).

Il peut s'agir aussi de mesures ellipsométriques. Les grandeurs mesurées sont alors les parties réelle et imaginaire du rapport du coefficient de réflexion en polarisation (P) au coefficient de réflexion en polarisation (S).

On note généralement  $\rho = |\rho| \exp(j\Delta)$  ce rapport complexe (avec  $j^2 = -1$ ). Les grandeurs généralement traitées sont  $|\rho|$ , que l'on note  $\tan(\psi)$ , et  $\cos(\Delta)$ , ou des combinaisons des deux. Par souci de 5 généralité, nous noterons  $S_1$  et  $S_2$  ces grandeurs.

Les spectres  $S_i$ ,  $i \in [1, 2]$ , sont mesurés sur une plage de longueurs d'ondes  $[\lambda_m, \lambda_M]$ . L'angle d'incidence peut être quelconque. Plusieurs spectres peuvent être mesurés à différents angles d'incidence 10 afin d'obtenir un spectre plus riche. Nous noterons  $s(\theta, \lambda) = \{S_1(\theta, \lambda), S_2(\theta, \lambda)\}$  le spectre ellipsométrique.

De façon complémentaire, des mesures goniométriques (coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence) peuvent être ajoutées aux mesures 15 servant à la caractérisation, afin de déterminer l'épaisseur des diverses couches, pour une ou plusieurs longueurs d'ondes. Ces mesures ne sont pas suffisantes en elles-mêmes puisque l'on veut déterminer l'indice de réfraction complexe sur une gamme spectrale allant de 20  $\lambda_m$  à  $\lambda_M$ .

Afin de simplifier l'exposé, nous noterons  $\Psi$  un ensemble de spectres réflectométrique ou/et ellipsométrique(s) (et éventuellement goniométriques pour quelques longueurs d'ondes).

25 Sans perdre aucune généralité, nous n'exposerons, dans la présente description, le mode d'utilisation des procédés de l'art antérieur et de la présente invention que dans le cas d'une seule couche mince d'un matériau, formée sur un substrat connu.

L'épaisseur de cette couche est notée  $\epsilon$  et l'indice de réfraction complexe du matériau à la longueur d'onde  $\lambda$  est noté  $n^*(\lambda)$ .

On rappelle à ce propos que la partie 5 réelle (respectivement imaginaire) de cet indice de réfraction complexe est notée  $n(\lambda)$  (respectivement  $k(\lambda)$ ) et appelée "indice de réfraction" (respectivement "coefficients d'extinction").

En outre on note  $E_r(\Psi^{(1)}, \Psi^{(2)})$  une fonction 10 d'erreur (par exemple l'écart quadratique moyen) entre deux spectres  $\Psi^{(1)}$  et  $\Psi^{(2)}$ .

Par exemple, on pourra prendre, lorsque l'on dispose de spectres ellipsométriques sur plusieurs angles  $\theta_i$ ,  $i \in \{1..n\}$ , et d'un spectre reflectométrique :

$$15 \quad E_r(\Psi^{(1)}, \Psi^{(2)}) = \frac{1}{\lambda_M - \lambda_m} \int_{\lambda_m}^{\lambda_M} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [S_1^{(1)}(\theta_i, \lambda) - S_1^{(2)}(\theta_i, \lambda)]^2 + [S_2^{(1)}(\theta_i, \lambda) - S_2^{(2)}(\theta_i, \lambda)]^2 + [R^{(1)}(\lambda) - R^{(2)}(\lambda)]^2 \right] d\lambda \quad (1)$$

avec  $\Psi^{(1)}(\lambda) = \{S_1^{(1)}(\theta_i \in \{1..n\}, \lambda), S_2^{(1)}(\theta_i \in \{1..n\}, \lambda), R^{(1)}(\lambda)\}$

et  $\Psi^{(2)}(\lambda) = \{S_1^{(2)}(\theta_i \in \{1..n\}, \lambda), S_2^{(2)}(\theta_i \in \{1..n\}, \lambda), R^{(2)}(\lambda)\}$

20 Des facteurs de pondération peuvent être apportés à l'intégrale de façon à ce que la fonction d'erreur puisse tenir compte de variations sur la précision de mesure des spectres.

La caractérisation optique de couches de 25 matériaux s'articule généralement autour de deux applications :

La première application est le contrôle dimensionnel du dépôt de couches minces utilisées en microélectronique.

Généralement on connaît bien le matériau déposé, c'est-à-dire que l'on connaît bien l'indice de réfraction complexe de ce matériau aux longueurs d'ondes de la lumière utilisée pour la caractérisation.

5 Les lois suivies par l'indice de réfraction complexe sont soit tabulées, soit approchées par des lois physiques connues telles que, par exemple, le modèle de Cauchy, le modèle de Sellmeier (voir le document [3]), les lois de Forouhi (voir le document 10 [4]), et les lois d'oscillateurs harmoniques (voir le document [5]). Ces lois sont définies par un nombre fini de paramètres.

Par exemple, une loi de type Cauchy sans absorption à deux paramètres est définie de la manière 15 suivante :

$$\operatorname{Re}[n^*(\lambda)] = n(\lambda) = a_0 + \frac{a_1}{\lambda^2}$$

$$\operatorname{Im}[n^*(\lambda)] = k(\lambda) = 0$$

Lorsque l'on est sûr de la valeur des coefficients  $a_i (i \in \{1, 2\})$  mais que l'on ne connaît pas 20 l'épaisseur, un algorithme de recherche est utilisé afin de trouver l'épaisseur qui minimise l'erreur entre la mesure  $\Psi$  et la réponse théorique  $\bar{\Psi}$  compte tenu de l'indice modélisé.

L'algorithme de recherche peut être, par 25 exemple, la méthode du Simplex, la recherche Tabou, la méthode de Levendt-Marquart ou la méthode du recuit simulé (voir le chapitre 10 du document [6]).

Lorsque l'indice de réfraction est approximatif, les coefficients  $a_i$  sont intégrés dans la 30 procédure d'ajustement de  $\Psi$  et  $\bar{\Psi}$ . La recherche des

coefficients  $a_i$  constitue un procédé de caractérisation de l'indice de réfraction.

Cependant, lorsque la loi suivie par cet indice de réfraction est inconnue (il arrive que le matériau soit inconnu ou bien ne soit pas bien décrit par une loi physique connue), ce procédé reste approximatif et l'épaisseur risque d'être fausse.

La deuxième application est la caractérisation des matériaux.

Le procédé utilisé reste le même, mis à part que le matériau n'est pas bien connu. C'est précisément la fonction d'indice de réfraction complexe la plus proche de la réalité qui est visée.

Le type de loi peut être choisi par analogie avec d'autres matériaux. Cependant, la loi suivie par l'indice de réfraction complexe peut être compliquée, ce qui est par exemple le cas d'une loi d'oscillateurs harmoniques :

$$[n(E) + jk(E)]^2 = 1 + \sum_{i=1}^n \frac{Ai}{E + Ei + j\Gamma i} - \frac{Ai}{E - Ei + j\Gamma i}$$

Dans l'expression ci-dessus,  $j^2 = -1$  et l'indice de réfraction et le coefficient d'extinction sont exprimés non pas en fonction de  $\lambda$  mais de  $E$ , avec  $E = 1240/\lambda$  ( $\lambda$  en nm).

Dans ce cas, les coefficients des oscillateurs sont difficiles à trouver si l'on n'a pas leur ordre de grandeur. La recherche est difficilement automatisable, les algorithmes de recherche pouvant donner des réponses erronées et le temps perdu peut être considérable.

Il existe une alternative à la recherche des coefficients : la méthode point-à-point (PAP). Cette méthode PAP propose de ne pas choisir de loi physique et de rechercher l'indice de réfraction complexe du matériau pour chaque longueur d'onde  $\lambda_i$ , i ∈ [1...n], avec  $\lambda_1=\lambda_m$  et  $\lambda_n=\lambda_M$ .

Pour chaque  $\lambda_i$ , un algorithme de recherche tente de trouver l'épaisseur, l'indice  $n(\lambda_i)$  et le coefficient d'extinction  $k(\lambda_i)$  qui minimisent l'erreur entre la mesure  $\Psi(\lambda_i)$  et la réponse théorique  $\bar{\Psi}(\lambda_i, n(\lambda_i), k(\lambda_i), \varepsilon)$ .

Un tel procédé pose un problème parce que les divers points  $(\lambda_i, \varepsilon, n(\lambda_i), k(\lambda_i))$  ne sont pas forcément physiquement compatibles entre eux : par exemple, l'épaisseur trouvée peut varier en fonction de la longueur d'onde et la loi suivie par l'indice de réfraction complexe, plus simplement appelée loi d'indice, peut présenter des discontinuités.

Ce procédé est généralement valable seulement lorsque l'épaisseur est très bien connue et que les mesures sont de très bonne qualité.

#### EXPOSÉ DE L'INVENTION

La présente invention a pour but de remédier aux inconvénients précédents.

Le procédé objet de l'invention permet de caractériser un matériau sans utiliser un modèle physique, c'est-à-dire sans utiliser une loi physique suivie par l'indice de réfraction complexe du matériau

étudié. Il est donc tout particulièrement utile lorsqu'une telle loi n'est pas connue.

Ce procédé constitue une alternative aux procédés de caractérisation connus, mentionnés plus haut. Il peut être appelé "méthode des nœuds" car il utilise des "nœuds" c'est-à-dire des points de coordonnées ( $\lambda_i$   $n'_i$ ), où  $n'_i$  est la valeur prise par l'indice de réfraction complexe à la longueur d'onde  $\lambda_i$  et  $i$  prend un nombre limité de valeurs (entières).

De façon précise, la présente invention a pour objet un procédé de caractérisation optique d'au moins une couche d'un matériau dans un intervalle de longueurs d'ondes [ $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\max}$ ], cette couche étant formée sur un substrat, ce procédé étant caractérisé en ce que :

- on effectue un ensemble de mesures de réflectométrie et/ou d'ellipsométrie, cet ensemble de mesures conduisant à un spectre mesuré, noté  $\Psi$ ,
- on choisit  $m$  longueurs d'ondes initiales  $\lambda_1 \dots \lambda_m$  appartenant à cet intervalle,  $m$  étant un nombre entier au moins égal à 1, on associe, à chaque longueur d'onde, un indice de réfraction,
- on choisit une loi d'interpolation au moins pour l'indice de réfraction du matériau, pour les longueurs d'ondes comprises entre les longueurs d'ondes initiales  $\lambda_1 \dots \lambda_m$ ,
- on choisit  $M$  paramètres initiaux,  $M$  étant au moins égal à  $m$ , à savoir un indice de réfraction initial  $n_i$  pour chaque longueur d'onde initiale  $\lambda_i$ ,  $1 \leq i \leq m$ , les longueurs d'ondes initiales étant choisies de

manière à pouvoir déterminer par interpolation au moins l'indice de réfraction pour toute longueur d'onde de l'intervalle  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ , les couples  $(\lambda_i, n_i)$  étant appelés nœuds,

- 5 - on choisit des méthodes de calcul de réflectométrie et d'ellipsométrie,
- on choisit aussi une fonction d'erreur  $E_r$ , représentative de l'écart entre deux spectres  $\Psi_1$  et  $\Psi_2$ , les spectres  $\Psi_1$  et  $\Psi_2$  étant calculés ou mesurés sur un nombre de points supérieur au nombre  $m$  de nœuds,
- à l'aide des  $m$  longueurs d'ondes initiales, des  $M$  paramètres initiaux et de la loi d'interpolation, on met en œuvre le processus d'optimisation suivant :
- 15 - on détermine un spectre théorique, noté  $\bar{\Psi}$ , en fonction des méthodes de calcul choisies, et de l'indice déduit par interpolation de sa valeur en  $\lambda_i$ ,  $i$  allant de 1 à  $m$ , sur le spectre  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ ,
- on détermine l'erreur  $E_r (\Psi, \bar{\Psi})$ , entre le spectre mesuré et le spectre théorique,
- on minimise cette erreur en faisant varier la position des valeurs des indices inconnus et/ou l'épaisseur de la couche et/ou les valeurs des indices de réfraction aux longueurs d'ondes initiales, et l'on obtient un spectre,
- on ajoute des longueurs d'ondes aux longueurs d'ondes initiales  $\lambda_1 \dots \lambda_m$ , les longueurs d'ondes ajoutées constituant de nouveaux nœuds,
- on répète le procédé en choisissant un nombre  $m'$  de longueurs d'ondes initiales,  $m'$  étant supérieur à  $m$ ,

et  $M'$  paramètres initiaux,  $M'$  étant supérieur à  $M$ , jusqu'à ce que la précision sur chaque spectre ainsi représenté au mieux soit égale à une précision prédefinie.

5 Il est question, ci-dessus, d'effectuer la caractérisation optique sur un intervalle de longueurs d'ondes  $\lambda$ , en l'occurrence l'intervalle  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ , mais on ne sortirait pas du cadre de l'invention en effectuant cette caractérisation optique

10 - sur un intervalle de longueurs d'ondes inverses  $1/\lambda$ , en l'occurrence sur un intervalle  $[(1/\lambda)_{\min}, (1/\lambda)_{\max}]$ , où  $(1/\lambda)_{\min}$  est égal à  $1/(\lambda_{\max})$  et  $(1/\lambda)_{\max}$  à  $1/(\lambda_{\min})$ ,

15 - ou sur un intervalle d'énergies  $E$  (avec  $E = hv = hc/\lambda$  où  $h$  est la constante de Planck,  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide et  $v$  la fréquence correspondant à  $\lambda$ ), en l'occurrence sur un intervalle  $[E_{\min}, E_{\max}]$ , où  $E_{\min}$  est égal à  $hc/(\lambda_{\max})$  et  $E_{\max}$  à  $hc/(\lambda_{\min})$ ,

20 - ou, plus généralement, sur un intervalle  $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$  de valeurs d'une variable  $\alpha$  fonction de  $\lambda$ .

L'homme du métier adaptera aisément la définition du procédé objet de l'invention que l'on vient de donner en fonction de la variable  $\lambda$ , ainsi que 25 les modes de réalisation particuliers et les exemples qui en sont donnés par la suite, à l'une ou l'autre des variables  $1/\lambda$  et  $E$  et, plus généralement, à la variable  $\alpha$  dépendant de  $\lambda$ .

Par exemple, si l'on effectue la 30 caractérisation optique sur l'intervalle  $[(1/\lambda)_{\min},$

( $1/\lambda$ )<sub>max</sub>] (respectivement sur l'intervalle [E<sub>min</sub>, E<sub>max</sub>]), on remplacera l'étape où l'on choisit les longueurs d'ondes initiales  $\lambda_1.. \lambda_m$  par une étape où l'on choisit des longueurs d'ondes inverses initiales 5 ( $1/\lambda$ )<sub>1..(1/\lambda)\_m</sub> (respectivement des énergies initiales E<sub>1..E\_m</sub>) et, plus généralement, par une étape où l'on choisit des valeurs initiales  $\alpha_1.. \alpha_m$  de  $\alpha$ .

En outre, l'invention s'applique pour caractériser un spectre ou une partie de spectre.

10 Selon un premier mode de mise en œuvre particulier du procédé objet de l'invention, m est au moins égal à 2.

Selon un deuxième mode de mise en œuvre particulier du procédé objet de l'invention, m est égal 15 à 1 et l'on choisit des indices de réfraction initiaux égaux.

Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, le matériau est non absorbant et le nombre M est égal à m, le coefficient d'extinction du matériau 20 étant pris égal à 0.

Selon un autre mode de réalisation particulier de l'invention,

- M est au moins égal à 2 m,
- on choisit en outre une loi d'interpolation pour le 25 coefficient d'extinction du matériau,
- pour chaque longueur d'onde initiale  $\lambda_i$ ,  $1 \leq i \leq m$ , on choisit en outre un coefficient d'extinction initial  $k_i$ , les longueurs d'ondes initiales étant en outre choisies de manière à pouvoir déterminer par

interpolation le coefficient d'extinction pour toute longueur d'onde de l'intervalle  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ ,

- dans le processus d'optimisation, on minimise l'erreur en faisant varier en outre les valeurs des 5 coefficients d'extinction aux longueurs d'ondes initiales et les longueurs d'ondes ajoutées sont en outre placées de façon à représenter au mieux le spectre du coefficient d'extinction du matériau.

Dans ce cas, selon un mode de réalisation 10 particulier de l'invention,  $m$  est égal à 1 et l'on choisit des indices de réfraction initiaux égaux et des coefficients d'extinction initiaux égaux.

Selon un mode de mise en œuvre particulier du procédé objet de l'invention, la couche de matériau 15 est mince, c'est-à-dire a une épaisseur inférieure à la longueur de cohérence de la lumière utilisée pour les mesures, on choisit un paramètre initial supplémentaire, à savoir une épaisseur initiale de couche, et dans le processus d'optimisation on minimise 20 l'erreur en faisant en outre varier la valeur de l'épaisseur de couche.

Selon un autre mode de mise en œuvre particulier du procédé objet de l'invention, la couche de matériau est épaisse, c'est-à-dire n'est pas mince, 25 et  $M$  est au plus égal à 2 m.

Selon un autre mode de mise en œuvre particulier, l'épaisseur de la couche de matériau est connue avec une précision suffisante et  $M$  est au plus égal à 2 m.

30 Chaque loi d'interpolation peut être choisie parmi les lois d'interpolation linéaires, les

lois d'interpolation cubiques, les lois d'interpolation polynômiales et les lois d'interpolation de type fonction « spline ».

Dans l'invention, la répartition des nœuds  
5 peut être homogène.

#### BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation donnés ci-après, à titre purement indicatif et 10 nullement limitatif, on faisant référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique de dispositifs permettant de caractériser une couche conformément à l'invention,
- 15 - la figure 2 montre les variations de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde, pour un matériau suivant une loi de Cauchy (courbe I) et pour un matériau caractérisé conformément à l'invention (courbe II), et
- 20 - la figure 3A (respectivement 3B) montre les variations de l'indice de réfraction (respectivement du coefficient d'extinction) en fonction de la longueur d'onde, pour un matériau suivant une loi à deux oscillateurs (courbe I) et pour 25 un matériau caractérisé conformément à l'invention.

#### EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

L'invention propose une alternative aux procédés classiques, mentionnés plus haut. Elle permet 30 d'allier la cohérence d'un modèle de couche (correspondant à une loi d'indice continue et à des

épaisseurs physiques constantes), à la généralité concernant la loi d'indice à trouver (comme dans la méthode PAP). En outre, la résolution n'est limitée que par la résolution du spectre mesuré.

5 Dans le procédé objet de l'invention, le spectre d'indice  $n^*$  ( $\lambda$ ) est caractérisé par :

- un nombre réduit de "nœuds", qui sont des points de coordonnées  $(\lambda_i, n_i, k_i)$ , avec  $n_i = n(\lambda_i)$  et  $k_i = k(\lambda_i)$ , et
- 10 - une loi d'interpolation entre les nœuds, qui peut être, par exemple, linéaire, cubique, de type « spline » ou polynomiale (de degré quelconque).

Cette loi d'interpolation permet de calculer, à partir des nœuds, les indices de réfraction et les coefficients d'extinction pour les longueurs d'ondes situées entre les nœuds.

Par exemple, lorsque l'indice de réfraction est caractérisé par un ensemble de valeurs pour des longueurs d'ondes  $\lambda_1 \dots \lambda_m$ , on peut utiliser une interpolation linéaire entre deux longueurs d'ondes  $\lambda_i$  et  $\lambda_{i+1}$  pour calculer l'indice  $n$  à la longueur d'onde  $\lambda$  (voir le document [6] chapitre 3) :

$$n(\lambda) = \frac{(\lambda_{i+1} - \lambda)n(\lambda_i) + (\lambda - \lambda_i)n(\lambda_{i+1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_i}$$

avec  $\lambda_i < \lambda < \lambda_{i+1}$

25 On peut faire de même pour le coefficient d'extinction.

Lorsque le nombre de nœuds le permet, des formules d'interpolation plus complexes, faisant intervenir les nœuds voisins, peuvent être utilisées 30 (voir le document [6] chapitre 3).

Un modèle de couche est donc caractérisé par une épaisseur  $\varepsilon$  et une famille de nœuds.

On donne ci-après un exemple du procédé objet de l'invention. Dans cet exemple, les mesures  $\Psi$  sont constituées d'une mesure réflectométrique  $R(\lambda)$  et d'une mesure ellipsométrique  $S_{1,2}(\theta, \lambda)$  où  $\theta$  est l'angle d'incidence du faisceau lumineux que l'on envoie sur la couche à étudier lors de la mesure d'ellipsométrie.

Cette couche est une couche mince de sorte que l'épaisseur de cette couche est aussi une variable du problème. En outre, on suppose qu'une seule couche est inconnue, cette couche étant formée sur un substrat connu.

Expliquons d'abord brièvement cet exemple, qui utilise un algorithme.

A partir d'informations supposées sur l'épaisseur  $\varepsilon$  de la couche étudiée, sur l'indice de réfraction  $n(\lambda)$  et sur le coefficient d'extinction  $k(\lambda)$ , du matériau de cette couche, on construit des nœuds de départ (en faible nombre) et une épaisseur de départ  $\varepsilon$ .

On dispose ainsi de  $m$  nœuds et, par interpolation, on peut connaître  $n(\lambda)$  et  $k(\lambda)$  en dehors des valeurs des longueurs d'ondes associées aux nœuds.

A partir de l'épaisseur de départ  $\varepsilon$  et de ces valeurs de départ  $n(\lambda)$  et  $k(\lambda)$ , on détermine le spectre théorique  $\bar{\Psi}$  en utilisant des calculs ellipsométriques et réflectométriques.

Par ailleurs, au moyen de dispositifs d'ellipsométrie et de réflectométrie et d'un

spectromètre, on obtient  $S_{1,2}(\theta, \lambda)$  et  $R(\lambda)$  et l'on en déduit les mesures notées  $\Psi$ .

On compare ensuite  $\Psi$  et  $\bar{\Psi}$  en utilisant une fonction d'erreur  $Er$  et l'on optimise la valeur de 5 l'indice de réfraction et la valeur du coefficient d'extinction aux différents nœuds, ainsi que la valeur de l'épaisseur, en cherchant à minimiser  $Er(\Psi, \bar{\Psi})$ .

Lorsque ces valeurs sont optimisées et si la précision sur le spectre  $n(\lambda)$ , le spectre  $k(\lambda)$  et 10 l'épaisseur  $\epsilon$  n'est pas suffisante, on ajoute de nouveaux nœuds, on fait varier l'épaisseur  $\epsilon$ , et l'on recommence la détermination de  $\bar{\Psi}$ , la comparaison de  $\Psi$  et  $\bar{\Psi}$  et l'optimisation mentionnées plus haut, etc.

On arrête la boucle ainsi définie lorsque 15 la précision sur chacun des spectres  $n(\lambda)$  et  $k(\lambda)$  et sur l'épaisseur  $\epsilon$  est jugée suffisante.

Les spectres  $n(\lambda)$ ,  $k(\lambda)$  et l'épaisseur  $\epsilon$  sont ainsi caractérisés.

La figure 1 montre de façon schématique la 20 couche étudiée 2, formée sur un substrat 4. On voit le dispositif d'ellipsométrie 5,6, le dispositif de réflectrométrie 8 et le spectromètre 10. On voit en outre des moyens électroniques de traitement 12 permettant de caractériser  $n(\lambda)$ ,  $k(\lambda)$  et  $\epsilon$  en fonction 25 des informations fournies par le spectromètre 10 et conformément au procédé de l'invention. Ces moyens 12 sont munis de moyens d'affichage 14.

Revenons de façon plus détaillée sur l'exemple donné.

Le procédé de cet exemple comporte d'abord une étape d'initialisation.

L'algorithme débute avec un nombre réduit de nœuds (2 ou plus de 2). Cependant, on peut débuter 5 par un seul nœud en imposant un indice de réfraction et un coefficient d'extinction qui restent constants lorsque la longueur d'onde varie.

On choisit des positions de nœuds de façon à pouvoir, à partir de cette famille de nœuds, déduire 10 tout le spectre par interpolation. Le modèle de couche est donc à 3 paramètres ou plus, puisque l'épaisseur est aussi une variable à déterminer. La table d'indice sur tout le spectre est donc déduite des nœuds par interpolation.

15 C'est le cas lorsque l'épaisseur des couches est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde (couches minces). Mais lorsque l'épaisseur de la couche est très importante, l'épaisseur n'intervient quasiment plus dans le calcul de la réponse de la 20 couche, et n'est donc plus une variable du problème.

Par exemple, dans le cas de disques optiques, sur lesquels une couche très importante est déposée (son épaisseur est de l'ordre de 1 millimètre), le coefficient de réflexion d'une telle couche n'est 25 plus fonction de l'épaisseur de la couche, mais seulement de l'indice de réfraction de celle-ci.

Par exemple, on choisit de placer les deux premiers nœuds aux extrémités  $\lambda_{\min}$  et  $\lambda_{\max}$  du spectre. Les valeurs de l'indice complexe en ces 30 extrémités sont choisies en fonction du type du matériau étudié. Par exemple, sur un spectre

ellipsométrique entre 300nm et 800nm d'une couche mince de résine photosensible, on prend  $n(300\text{nm})=n(800\text{nm})=1,5$  et  $k(300\text{nm})=k(800\text{nm})=0$ .

Lorsque le spectre n'est caractérisé que  
5 par deux nœuds, l'indice entre les extrêmes est déterminé par interpolation linéaire. Dans le cas considéré, on a donc  $n(\lambda)=1,5$  et  $k(\lambda)=0$  pour  $\lambda$  appartenant à [300nm, 800nm].

A partir de trois nœuds, on choisit plutôt  
10 une interpolation cubique afin d'obtenir des formes de loi d'indice plus douces que celles obtenues par interpolation linéaire.

L'épaisseur de départ est, quant à elle,  
15 choisie aussi proche que possible de l'épaisseur réelle.

#### Phase 2

On procède ensuite à une détermination optimale des valeurs de l'indice de réfraction et du coefficient d'extinction sur les nœuds et de la valeur  
20 de l'épaisseur.

Pour ce faire, les spectres  $\bar{\Psi}(\lambda)$  sont calculés à l'aide du modèle de couche utilisé, résultant du choix des nœuds, de la loi d'interpolation et de l'épaisseur de la couche.

Le modèle physique utilisé pour le calcul  
25 de  $\bar{\Psi}$  est bien sûr fonction de la méthode de mesure utilisée, c'est-à-dire notamment de l'angle d'incidence de la lumière, du spectre utilisé et du modèle de couches minces ou de couches épaisses le cas échéant  
30 (voir par exemple les modèles de couches empilées dans le document [3]).

Les spectres  $\Psi$  étant constitués par un ensemble de mesures de natures diverses (par exemple des mesures ellipsométriques et réflectométriques), on utilise pour les mesures de réflectométrie 5 (respectivement d'ellipsométrie) une méthode de calcul de réflectométrie (respectivement d'ellipsométrie).

Les mesures réflectométriques et ellipsométriques sont combinées par l'intermédiaire d'une fonction d'erreur  $Er(\Psi, \bar{\Psi})$  qui est par exemple du 10 genre de celle qui est définie par l'équation (1).

Grâce à une fonction de recherche telle que Simplex par exemple, on minimise l'écart entre  $\bar{\Psi}(\lambda)$  et  $\Psi(\lambda)$ , en faisant varier la valeur de l'indice de réfraction et la valeur du coefficient d'extinction à 15 la position de chacun des nœuds ainsi que l'épaisseur de couche (si cette épaisseur est un facteur important dans le calcul de  $\bar{\Psi}$ ). Lorsque l'écart est minimum c'est-à-dire lorsque  $Er(\Psi, \bar{\Psi})$  est minimum, cela signifie que les mesures réflectométriques et 20 ellipsométriques coïncident au mieux (pour un nombre de nœuds donné).

A ce stade, on obtient, pour un nombre connu de nœuds et une position spectrale connue pour chacun de ces des nœuds, le modèle de couche (indice de réfraction, coefficient d'extinction et épaisseur) qui correspond au mieux à la couche réelle.

La validité du modèle trouvé est d'autant plus assurée que le nombre de mesures est grand. Pour avoir un grand nombre de mesures, on peut par exemple 30 utiliser plusieurs angles d'incidence de la lumière  $\theta_i$ ,

$1 \leq i \leq \ell$ , pour les spectres ellipsométriques, faire une mesure réflectométrique et faire des mesures goniométriques complémentaires.

### Phase 3

5                   Ensuite, on ajoute un nombre fini de nœuds. Dans un premier mode de réalisation, les nœuds rajoutés sont positionnés de façon à représenter au mieux les spectres  $n(\lambda)$  et  $k(\lambda)$ . A titre d'exemple, on place ces nœuds supplémentaires aux endroits où l'écart entre  $\Psi$  10 et  $\bar{\Psi}$  est maximum ou aux endroits en lesquels les nœuds sont les plus espacés. Et l'on retourne à la phase 2 tant que la précision sur chacun des spectres  $n(\lambda)$  et  $k(\lambda)$  et sur l'épaisseur  $\varepsilon$  n'est pas suffisante, c'est-à-dire n'est pas égale à une précision 15 prédefinie.

Dans un deuxième mode de réalisation, on intercale de nouveaux nœuds entre deux nœuds de l'ensemble de nœuds préalablement choisis et qui se répartiront de façon homogène sur le spectre.

20                  Dans ce qui suit, nous donnons deux exemples courants d'application de l'invention. Ces exemples mettent en jeu deux types de matériaux qui suivent des lois différentes.

A partir de mesures ellipsométriques et 25 réflectométriques, nous proposons de retrouver les lois physiques suivies par ces matériaux. Nous procémons de la façon suivante :

Un matériau fictif est créé, ce matériau suivant une loi théorique connue (une loi de Cauchy ou 30 une loi d'oscillateurs harmoniques), avec des paramètres que nous fixons arbitrairement. Les

variations de l'indice de réfraction complexe en fonction de la longueur d'onde sont ainsi parfaitement connues.

Nous imposons en outre au matériau une épaisseur de 200,00nm, sur un substrat de silicium, ce dernier étant très bien connu.

Des mesures fictives (mesures ellipsométriques, mesures réflectométriques) sont calculées, puis bruitées de façon à introduire un défaut d'appareillage.

Tout se passe comme si nous avions des mesures réelles, effectuées sur le matériau. Mais, contrairement à la réalité, nous connaissons parfaitement l'indice de réfraction complexe puisque nous l'avons fixé, de même que nous avons fixé l'épaisseur de la couche de matériau.

Nous testons ici la méthode "en aveugle", c'est-à-dire que nous partons d'une épaisseur fausse (220nm) et d'indices de réfraction complexes faux, puisqu'ils sont sensés être inconnus.

Nous appliquons le procédé objet de l'invention puis nous comparons l'indice de réfraction complexe trouvé à l'indice de réfraction complexe théorique. Nous retrouvons bien les mêmes lois, très précisément, ainsi que la même épaisseur de couche.

Prenons comme premier exemple un matériau dont l'indice de réfraction complexe suit une loi de Cauchy telle que :

$$n(\lambda) = 1,5 + 0,1 \frac{300^2}{\lambda^2} + 0,1 \frac{300^4}{\lambda^4}$$

30

 $k(\lambda) = 0$

Cette loi d'indice est typique des résines photosensibles (dans la plage spectrale 300-800nm).

Afin de retrouver à l'aide de la méthode des nœuds (c'est-à-dire du procédé objet de 5 l'invention) la loi d'indice mentionnée ci-dessus, nous effectuons deux mesures, à savoir une mesure ellipsométrique à un angle de 70° et une mesure réflectométrique.

Les conditions de traitement sont les 10 suivantes :

- le spectre traité est compris entre 300nm et 800nm,
- au départ, les nœuds sont aux positions (300nm, 1,6) et (800nm, 1,6), c'est-à-dire que l'indice est considéré comme variant linéairement entre 300nm et 15 800nm, et que sa valeur est constante (égale à 1,6),
- le nombre de nœuds est augmenté itérativement en rajoutant au moins un nœud à chaque itération (par exemple, on ajoute 2 nœuds),
- la loi d'interpolation est une loi cubique, lorsque 20 le nombre de nœuds est supérieur à 2, sinon elle est linéaire, et
- l'algorithme de minimisation utilisé est un algorithme de type Simplex.

La figure 2 permet de comparer l'indice de 25 réfraction correspondant au matériau fictif qui suit parfaitement une loi de Cauchy (courbe I) à l'indice de réfraction que nous trouvons par la méthode des nœuds (courbe II), à l'aide de 6 nœuds (représentés par des cercles sur la figure 2). Nous avons utilisé un  $\Psi$  30 composé d'une mesure ellipsométrique  $\{S_1(\lambda), S_2(\lambda)\}$  à 70° et d'une mesure réflectométrique  $R(\lambda)$ .

Prenons comme deuxième exemple un matériau dont l'indice de réfraction complexe suit une loi à deux oscillateurs, telle que :

$$[n(E) + jk(E)]^2 = 1 + \sum_{i=1}^2 \frac{A_i}{E + E_i + jG_i} - \frac{A_i}{E - E_i + jG_i}$$

5                   avec

$$j^2 = -1 \text{ et } E = 1240/\lambda \text{ (\lambda en nm)}$$

$$A_1 = 0,25 \times 1,5^2 \quad A_2 = 0,25 \times 1,5^2$$

$$E_1 = 1240/400 \quad E_2 = 1240/300$$

$$G_1 = 0,3 \quad G_2 = 0,3$$

10                 La méthode des nœuds est appliquée à un ensemble de mesures ellipsométriques effectuées entre 250nm et 800nm, à 75°, 70°, 60°, et 45°, avec en plus une mesure réflectométrique. L'épaisseur réelle du matériau étant de 200nm, on trouve une épaisseur de  
 15                  200,25 nm avec la méthode des nœuds. L'ajustement sur la loi d'indice est très bon.

Les figures 3A et 3B montrent respectivement les reconstructions des courbes  $n(\lambda)$  et  $k(\lambda)$  du matériau à l'aide de la méthode des nœuds. La reconstruction est effectuée à l'aide de quatre spectres ellipsométriques et d'un spectre réflectométrique. Les pics d'absorption réels sont très bien représentés par la courbe obtenue par interpolation cubique entre les nœuds (représentés par 20 des cercles sur les figures 3A et 3B).  
 25

Sur la figure 3A, la courbe I (respectivement II) correspond à  $n$  suivant parfaitement la loi choisie (respectivement à  $n$  trouvé par la méthode des nœuds).

Sur la figure 3B, la courbe I (respectivement II) correspond à  $k$  suivant parfaitement la loi choisie (respectivement à  $k$  trouvé par la méthode des noeuds).

5 On vient de décrire des exemples de l'invention. On remarquera d'une manière plus générale que, dans cette dernière, on considère un ensemble  $X$  de valeurs, avec  $X = \{n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_m, k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_m, \varepsilon\}$ , où

10  $n_i$  est la valeur de l'indice de réfraction au noeud  $\lambda_i$ ,  $i \in \{1 \dots m\}$ ,  $m$  étant le nombre de noeuds  
 $k_i$  est la valeur du coefficient d'absorption au noeud  $\lambda_i$ ,  $i \in \{1 \dots m\}$ ,

$\varepsilon$  est l'épaisseur de la couche étudiée.

15 L'opération de minimisation d'erreur  $E_r(\Psi, \bar{\Psi})$  revient à trouver l'ensemble  $X$  tel que  $E_r$  soit minimum.

20 Lorsque l'on n'impose pas de contrainte particulière, la minimisation est une minimisation à  $2xm+1$  paramètres. On peut bien sûr ajouter des contraintes afin de diminuer le nombre de variables.

En particulier, si l'on sait que le matériau est non absorbant, on impose  $k_i=0$  pour tout  $i$  de  $\{1 \dots m\}$  et  $X$  devient :  $X = \{n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_m, \varepsilon\}$ .

25 Si, par une mesure complémentaire (par exemple une mesure de goniométrie ou une mesure directe non optique), on connaît l'épaisseur de la couche considérée avec une précision suffisante, l'épaisseur  $\varepsilon$  n'est plus une variable et l'on a :  
 $X = \{n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_m, k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_m\}$ .

Les deux options précédentes peuvent être bien sûr combinées.

De plus, la présente invention n'est pas limitée à la caractérisation de couches minces. Elle 5 s'applique aussi à la caractérisation de couches épaisses.

En outre, la présente invention n'est pas limitée à la caractérisation d'une seule couche, formée sur un substrat. Elle s'applique aussi à la 10 caractérisation de deux, ou plus de deux, couches formées sur un substrat.

Les documents cités dans la présente description sont les suivants :

[1] R.M.A. Azzam and N.M. Bashara,  
15 Ellipsometry and Polarized Light, North-Holland Physics Publishing, 1997, chapitre 6.

[2] B. K. Minhas, S.A. Coulombe, S. Sohail, H. Naqvi and J.R. McNeil, Ellipsometric scatterometry for the metrology of sub-0.1- $\mu\text{m}$ -linewidth structures, 20 Applied Optics, 37(22) : 5112-5115, 1998.

[3] M. Born and E. Wolf, Principle of Optics, Cambridge University Press edition.

[4] A.R. Forouhi and I. Bloomer, Optical dispersion relations for amorphous semiconductors and 25 amorphous dielectrics, Physical Review B, 34(10) : 7018-7026, November 1986.

[5] F. L. Terry, Jr., A modified harmonic oscillator approximation scheme for the dielectric constants of  $\text{Al}_x\text{G}_{1-x}\text{As}$ , Journal of Applied Physics, 30 70(1), 1991, pages 409-417.

[6] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery, Numerical Recipes in C, Cambridge University Press, 1992, chapitres 3 et 10.

## REVENDICATIONS

1. Procédé de caractérisation optique d'au moins une couche d'un matériau dans un intervalle de longueurs d'ondes  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ , cette couche étant formée sur un substrat, ce procédé étant caractérisé en ce que :
- on effectue un ensemble de mesures de réflectométrie et/ou d'ellipsométrie, cet ensemble de mesures conduisant à un spectre mesuré, noté  $\Psi$ ,
  - 10 - on choisit  $m$  longueurs d'ondes initiales  $\lambda_1 \dots \lambda_m$  appartenant à cet intervalle,  $m$  étant un nombre entier au moins égal à 1, on associe, à chaque longueur d'onde, un indice de réfraction,
  - 15 - on choisit une loi d'interpolation au moins pour l'indice de réfraction du matériau, pour les longueurs d'ondes comprises entre les longueurs d'ondes initiales  $\lambda_1 \dots \lambda_m$ ,
  - 20 - on choisit  $M$  paramètres initiaux,  $M$  étant au moins égal à  $m$ , à savoir un indice de réfraction initial  $n_i$  pour chaque longueur d'onde initiale  $\lambda_i$ ,  $1 \leq i \leq m$ , les longueurs d'ondes initiales étant choisies de manière à pouvoir déterminer par interpolation au moins l'indice de réfraction pour toute longueur d'onde de l'intervalle  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ , les couples  $(\lambda_i, n_i)$  étant appelés nœuds,
  - 25 - on choisit des méthodes de calcul de réflectométrie et d'ellipsométrie,
  - on choisit aussi une fonction d'erreur  $E_r$ , représentative de l'écart entre deux spectres  $\Psi_1$  et  $\Psi_2$ , les spectres  $\Psi_1$  et  $\Psi_2$  étant calculés ou mesurés

sur un nombre de points supérieur au nombre  $m$  de nœuds,

- à l'aide des  $m$  longueurs d'ondes initiales, des  $M$  paramètres initiaux et de la loi d'interpolation, on met en œuvre le processus d'optimisation suivant :
- on détermine un spectre théorique, noté  $\bar{\Psi}$ , en fonction des méthodes de calcul choisies, et de l'indice déduit par interpolation de sa valeur en  $\lambda_i$ ,  $i$  allant de 1 à  $m$ , sur le spectre  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ ,
- on détermine l'erreur  $E_r(\Psi, \bar{\Psi})$ , entre le spectre mesuré et le spectre théorique
- on minimise cette erreur en faisant varier la position des valeurs des indices inconnus et/ou l'épaisseur de la couche et/ou les valeurs des indices de réfraction aux longueurs d'ondes initiales, et l'on obtient un spectre,
- on ajoute des longueurs d'ondes aux longueurs d'ondes initiales  $\lambda_1 \dots \lambda_m$ , les longueurs d'ondes ajoutées constituant de nouveaux nœuds,
- on répète le procédé en choisissant un nombre  $m'$  de longueurs d'ondes initiales,  $m'$  étant supérieur à  $m$ , et  $M'$  paramètres initiaux,  $M'$  étant supérieur à  $M$ , jusqu'à ce que la précision sur chaque spectre ainsi représenté au mieux soit égale à une précision prédefinie.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel  $m$  est au moins égal à 2.

3. Procédé selon la revendication 1, dans lequel  $m$  est égal à 1 et l'on choisit des indices de réfraction initiaux égaux.

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel le matériau est non absorbant et le nombre M est égal à m, le coefficient d'extinction du matériau étant pris égal à 0.

5 5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel :

- M est au moins égal à 2 m,
- on choisit en outre une loi d'interpolation pour le coefficient d'extinction du matériau,
- 10 - pour chaque longueur d'onde initiale  $\lambda_i$ ,  $1 \leq i \leq m$ , on choisit en outre un coefficient d'extinction initial  $k_i$ , les longueurs d'ondes initiales étant en outre choisies de manière à pouvoir déterminer par interpolation le coefficient d'extinction pour toute longueur d'onde de l'intervalle  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ ,
- 15 - dans le processus d'optimisation, on minimise l'erreur en faisant varier en outre les valeurs des coefficients d'extinction aux longueurs d'ondes initiales et les longueurs d'ondes ajoutées sont en outre placées de façon à représenter au mieux le spectre du coefficient d'extinction du matériau.

20 6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel m est égal à 1 et l'on choisit des indices de réfraction initiaux égaux et des coefficients d'extinction initiaux égaux.

25 7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel la couche de matériau est mince, c'est-à-dire à une épaisseur inférieure à la longueur de cohérence de la lumière utilisée pour les mesures, on choisit un paramètre initial supplémentaire, à savoir une épaisseur initiale de

couche, et dans le processus d'optimisation on minimise l'erreur en faisant en outre varier la valeur de l'épaisseur de couche.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel la couche de matériau est épaisse, c'est-à-dire n'est pas mince, et M est au plus égal à 2 m.

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel l'épaisseur de la couche de matériau est connue avec une précision prédefinie et M est au plus égal à 2 m.

10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel chaque loi d'interpolation est choisie parmi les lois d'interpolation linéaires, les lois d'interpolation cubiques, les lois d'interpolation polynomiales et les lois d'interpolation de type fonction spline.

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel la répartition des 20 nœuds est homogène.

1 / 2

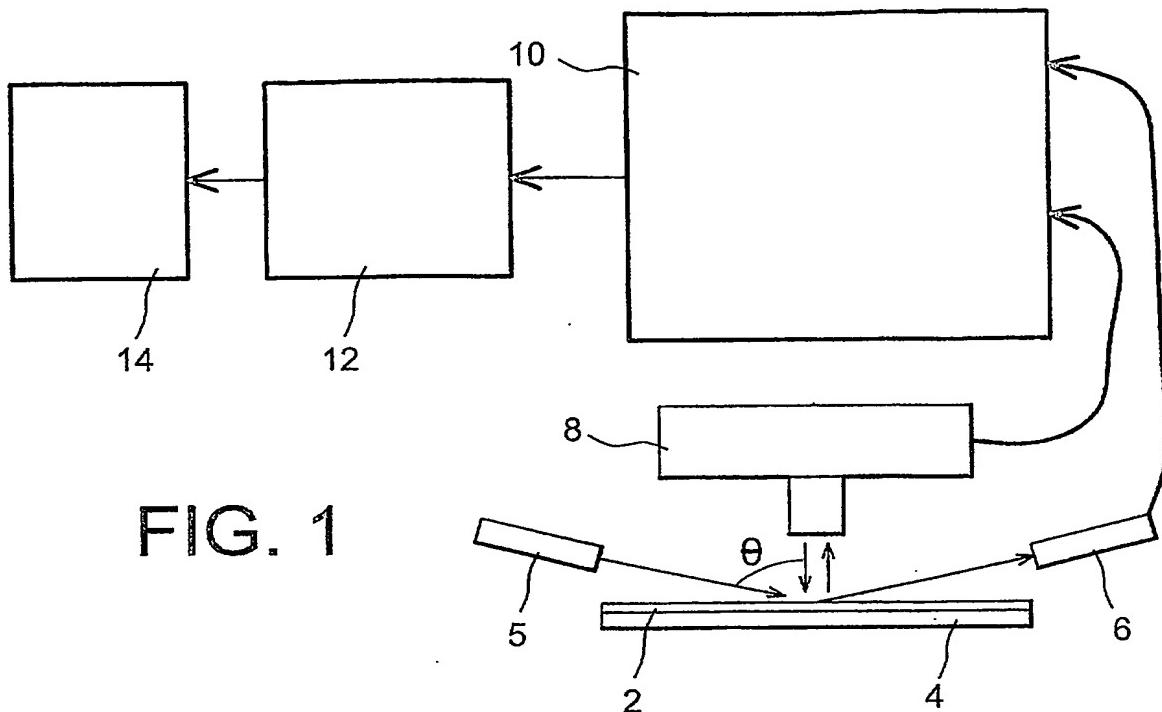


FIG. 1

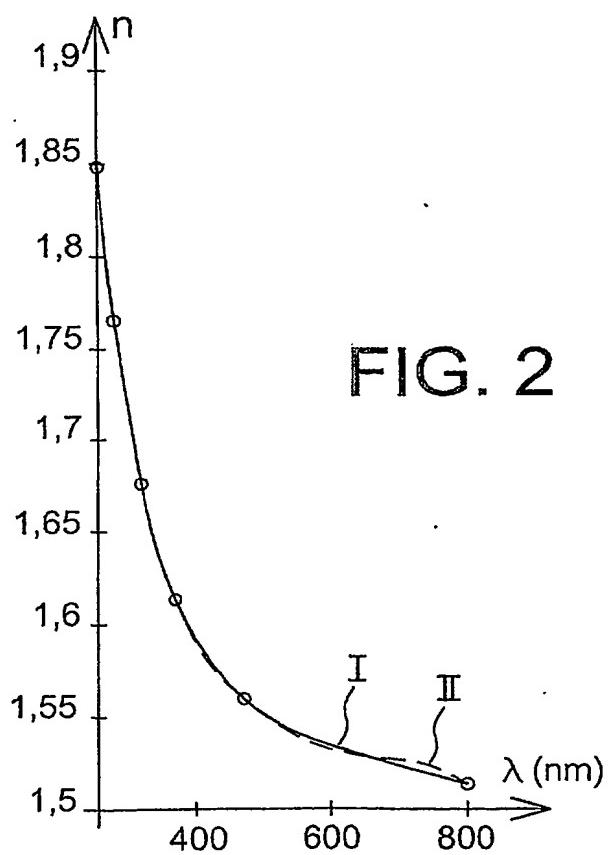


FIG. 2

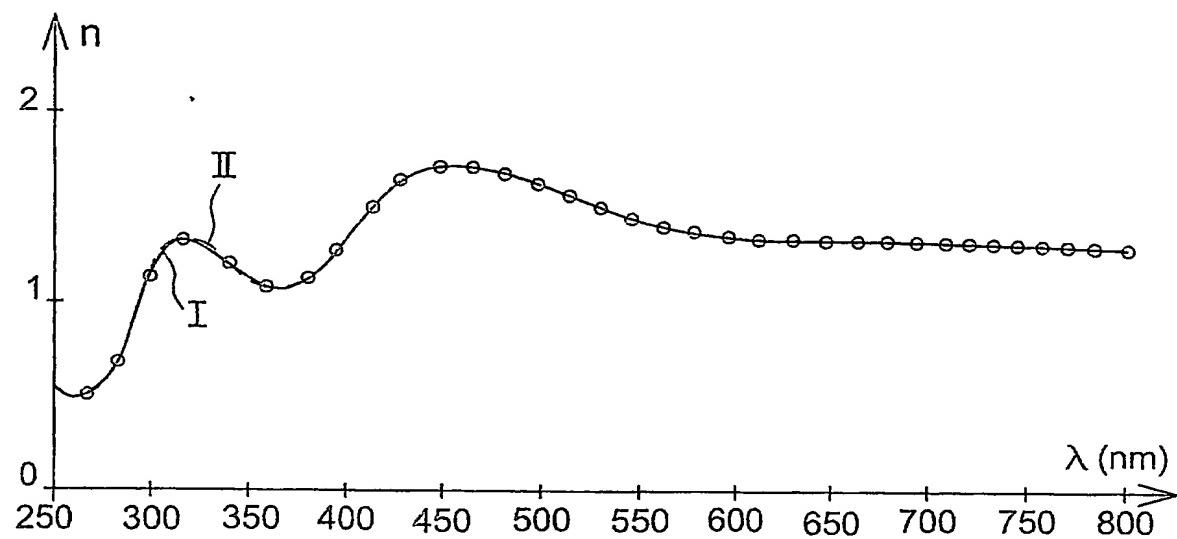


FIG. 3A

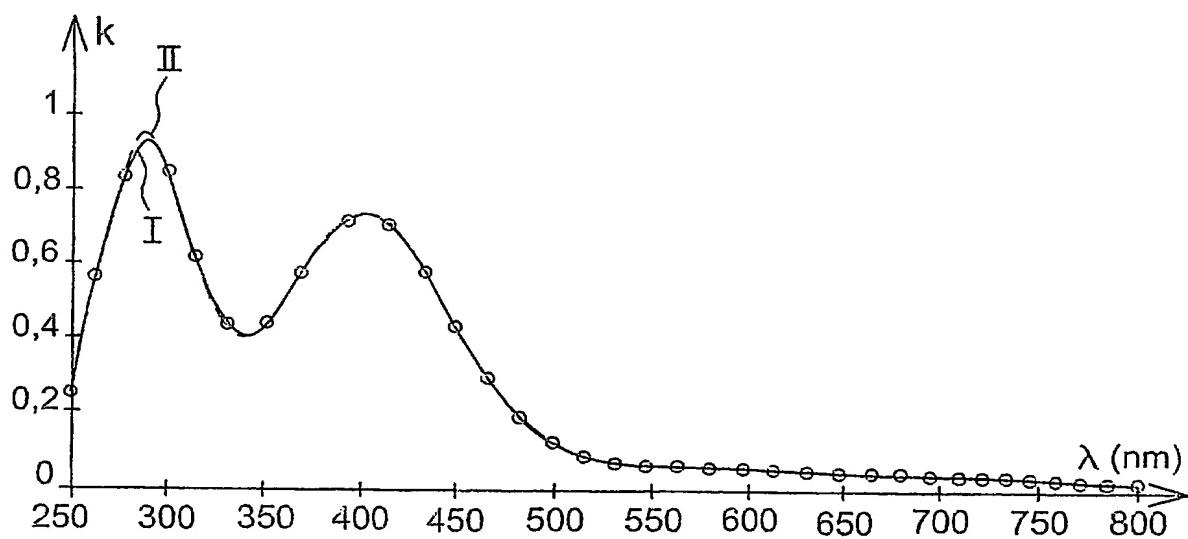


FIG. 3B

DÉPARTEMENT DES BREVETS

26 bis, rue de Saint Pétersbourg  
75800 Paris Cedex 08  
Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI

N° 11235\*03

DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S) Page N° 1.../1...

(À fournir dans le cas où les demandeurs et  
les inventeurs ne sont pas les mêmes personnes)

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 113 @ W / 270601

INV

Vos références pour ce dossier (facultatif)	b 14206.3/PV DD2381
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL	02.16847 DU 30.12.2002
TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum)	
PROCEDE DE CARACTERISATION OPTIQUE DE MATERIAUX SANS UTILISATION DE MODELE PHYSIQUE.	
LE(S) DEMANDEUR(S) :	
COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE 31-33 rue de la Fédération 75752 PARIS 15 ème.	
DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) :	
[1] Nom	HAZART
Prénoms	Jérôme
Adresse	Rue
	10, Place Saint-Eynard
	Code postal et ville
	[3 8 0 0 0] GRENOBLE
Société d'appartenance (facultatif)	
[2] Nom	
Prénoms	
Adresse	Rue
	Code postal et ville
	[ ]
Société d'appartenance (facultatif)	
[3] Nom	
Prénoms	
Adresse	Rue
	Code postal et ville
	[ ]
Société d'appartenance (facultatif)	
S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez plusieurs formulaires. Indiquez en haut à droite le N° de la page suivie du nombre de pages.	
DATE ET SIGNATURE(S) DU (DES) DEMANDEUR(S) OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire)	
PARIS LE 4 FEVRIER 2003 J.LEHU	